中国生态农业学报 2016 年 5 月 第 24 卷 第 5 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, May 2016, 24(5): 628−636

ChinaXiv合作期刊

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.151206

EM 保水剂施用对烤烟的影响及其施用制度的优选研究*

侯毛毛[1] 邵孝侯[2**] 陈竞楠[2] 翟亚明[2] 赵廷超[3] 王 刚[3]

(1. 福建农林大学园艺学院 福州 350002; 2. 河海大学水利水电学院 南京 210098;
3. 贵州省烟草公司黔西南州公司 兴义 562400)

摘 要 烤烟是我国重要的叶用经济作物，我国是烟草种植面积和烟叶总产量最高的国家，烤烟生产对我国西南诸省(如云、贵、川)国民经济和财政收入水平的提高有重要作用。但烟区出现的阶段性干旱经常影响烤烟的产量及其正常的成熟。因此，加强烤烟节水抗旱技术研究，合理调控烟田水分供应，是确保干旱地区烟叶优质适产的关键。本文分别以 MP3005KM 保水剂、秸秆、EM 活性钙和 EM 复壮液为主要材料制作 EM 保水剂，研究了不同 EM 保水剂处理对烤烟生长、产量和品质的影响，并引入熵权系数评价模型，建立评价指标体系，优选综合效益最优的 EM 保水剂施用制度。结果表明：不同 EM 保水剂处理均增加了烤烟单株叶面积，秸秆为主要材料的 EM 保水剂(T1 和 T2)对烤烟生长中后期叶面积的增长促进作用更明显；表征烤烟叶面积指数(LAI)动态变化的作物生长模型显示，T2(40 g·株$^{-1}$ EM 活性钙+300 g·株$^{-1}$ 秸秆)和 T6(40 g·株$^{-1}$ EM 活性钙+6 g·株$^{-1}$ MP3005KM)处理烤烟 LAI 具备较大的增长空间；EM 保水剂明显提高了烤烟旺长期和成熟期的净光合速率(P_n)，同时降低了蒸腾速率(T_r)，调节了烤烟叶片的光合作用。主成分分析显示，与不施保水剂相比，EM 保水剂的施用显著提高了烤烟的“综合品质”，秸秆为主要材料的 EM 保水剂的“提质”效益最优，T1 和 T2 烤烟品质综合主成分值分别达 3.25 和 2.76。综合考虑“高产”、“优质”、“节水”和“节肥”等因素，本研究推荐 40 g·株$^{-1}$ EM 活性钙结合 4 500 kg·hm^{-2} 秸秆段作为 EM 保水剂的施用制度，在该制度下，烤烟产量、灌溉水利用效率和氮肥偏生产力分别为 2 433.5 kg·hm^{-2}、0.608 kg·m^{-3} 和 27.04 kg·kg^{-1}。

关键词 有效微生物(EM) 保水剂 作物秸秆 烤烟 施用制度
中图分类号: S154.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)05-0628-09

Optimization of EM water-retention agent application in flue-cured tobacco*

HOU Maomao[1], SHAO Xiaohou[2**], CHEN Jingnan[2], ZHAI Yaming[2], ZHAO Tingchao[3], WANG Gang[3]

(1. Department of Gardening, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Tobacco Company of Qianxinan Prefecture, Xingyi 562400, China)

Abstract Flue-cured tobacco is an important economic crop in China, with the highest planting area and yield in the world. With a huge capacity to improve financial revenue, flue-cured tobacco production in China's southwest provinces (e.g., Yunnan, Guizhou, Sichuan) is critical for the national economy. But periodic droughts in tobacco planting zones affect the production of flue-cured tobacco and the normal maturity process. Enhancing studies on drought resistance, water-saving techniques and reasonable regulation of field water supply in flue-cured tobacco production is necessary to guarantee high

* 南方地区高效灌排与农业水土环境教育部重点实验室开放基金项目(2015002)、国家自然科学基金项目(51179054)、河海大学重点团队建设基金项目(2012B00914, 2014B04814)和贵州省烟草公司黔西南州公司技术开发与转化推广项目[州烟司(2015)41 号]资助
** 通讯作者: 邵孝侯，主要从事烤烟节水灌溉理论与技术方面的研究。E-mail: shaoxiaohou@163.com
侯毛毛，主要从事农业水土工程方面的研究。E-mail: wuduguer0407@126.com
收稿日期: 2015−11−11 接受日期: 2015−12−18

* Supported by the Open Fund of Key Laboratory of High Efficient Irrigation and Agricultural Water-soil Environment in Southern China (2015002), the National Natural Science Foundation of China (51179054), the Construction Funds of Teams in Hohai University (2012B00914, 2014B04814), and the Technology Development and Transformation Promotion Project in Qianxinan by Guizhou Tobacco Company [state tobacco company (2015) No. 41]
** Corresponding author, E-mail: shaoxiaohou@163.com
Received Nov. 11, 2015; accepted Dec. 18, 2015

chinaXiv:201711.00953v1

ChinaXiv合作期刊

quality and yield production in arid regions. In this study, MP3005KM water-retention agent, straw, EM activated calcium and EM rejuvenation were used to determine the effect of EM water-retention agent on tobacco growth, yield and quality. The study also used entropy weight coefficient evaluation model and system evaluation indexes to select the optimal application schemes with the most comprehensive benefits. The results showed that different treatments all increased tobacco leaf area of a single plant, especially, straw treatments (T1 and T2) more significantly increased leaf area of a single plant at later growth stage of flue-cured tobacco. The crop growth model simulating the dynamics of LAI showed that T2 (40 g·plant^{-1} EM activated calcium + 300 g·plant^{-1} straw) and T6 (40 g·plant^{-1} EM activated calcium + 6 g·plant^{-1} MP3005KM) obtained more larger increasing range. EM water-retention agent treatments increased net photosynthetic rate (P_n) and decreased transpiration rate (T_r), which regulated photosynthetic effects of tobacco leaves at vigorous stages (including maturity stage). Principle component analysis showed that EM water-retention application significantly increased the overall quality of tobacco leaves compared with no EM water-retention agent. Straw treatments had better quality improvement effects, with comprehensive quality indexes 3.25 and 2.76, respectively, for T1 and T2. In terms of high yield, good quality, water-saving potential and fertilizer use efficiency, the 40 g·plant^{-1} of EM-calcium combined with 4 500 kg·hm^{-2} of straw system was recommended as the application scheme of EM water-retention agent for flue-cured tobacco. Under this scheme, flue-cured tobacco yield, irrigation water use efficiency and nitrogen use efficiency were 2 433.5 kg·hm^{-2}, 0.608 kg·m^{-3} and 27.04 kg·kg^{-1}, respectively.

Keywords Effective microorganism (EM); Water-retention agent; Crop straw; Flue-cured tobacco; Application scheme

chinaXiv:201711.00953v1

烤烟是我国重要的叶用经济作物，我国是烟草种植面积和烟叶总产量最高的国家，烤烟生产对我国西南诸省(如云、贵、川)国民经济和财政收入水平的提高有重要作用。目前，我国烟区的可灌溉面积达 64.73 万 hm^2，但实际灌溉面积仅有 42.07 万 hm^2，约占总可灌溉面积的 65%，部分烟区灌溉仍依靠自然降雨，烟水配套设施建设较为落后[1]。我国主要烟区如贵州烟区，降雨往往集中在烤烟生长的前期和中期，烤烟生长后期常出现阶段性干旱，导致上部叶无法正常成熟，严重影响烤烟的品质和可用性；同时在烤烟生长的季节间和年际间降雨的变异较大，烤烟各个生育期不同程度的干旱频繁发生，造成烤烟产量和质量很不稳定[2]。因此，加强烤烟节水抗旱技术研究，提高土壤储水能力，是确保干旱地区烟叶优质适产的关键。

保水剂能改善土壤理化性能，增强土壤蓄水保墒能力，改善土壤团粒结构，提高土壤水分和养分的有效性，目前在旱作农业生产中得到了广泛应用，具有良好的发展前景，逐渐成为提高降雨利用率、缓解我国农业用水压力的重要举措。朱云峰[3]的研究表明，保水剂对土壤水分蒸发有较强抑制作用，将土壤含水量在较长时间范围内维持在较高水平，无论是室内还是室外试验都表明，施用保水剂可降低土壤容重，增加土壤孔隙度和毛管孔隙度，改善土壤通透性和物理结构。丁林等[4]关于保水剂对土壤水分含量影响的研究结果表明，保水剂处理和保水剂拌种处理保水效果十分明显，土壤储水量相比播种前分别增加 1.23 mm 和 2.25 mm。此外，关于保水剂对旱地作物增产的促进作用也不乏报道[5]。

有效微生物(effective microorganism, EM)包含乳酸菌、酵母菌、放线菌和光合细菌等 10 个属的 80 多种复合微生物，具有组成复杂、结构稳定、功能广泛、无毒无害等特点[6]。EM 内部的各种微生物协调作用，互为营养，能将较大的动植物残体逐级分解，形成共生增殖关系，同时其通过与有害微生物争夺营养和空间，产生抗氧化物，从而抑制有害微生物的繁殖。长期单独施用 EM 可协调作物体内营养成分，促进作物生长发育[7]。EM 与有机肥的配施可中和酸性植烟土壤[8]，提高烤烟产量和品质[9]。

然而，保水剂在烤烟种植中的应用还没有统一的技术标准，保水剂对烤烟影响机理的研究还很少，EM 保水剂的研究及应用更是鲜见报道。本研究以秸秆段、MP3005KM 保水剂、EM 为主要材料，设计不同 EM 保水剂处理，探索烤烟单株叶面积、叶面积指数(LAI)、光合指标、产量和品质对不同 EM 保水剂的响应机制，优选综合效益最优的 EM 保水剂施用制度，以期为干旱地区优质适产烟叶的种植提供有益参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2014 年和 2015 年的 5—9 月在江苏省南京市江宁区横溪镇南京市蔬菜花卉科学研究所内的蒸渗仪中进行。试验区日照充沛，全年日照时数为 2 017.2 h，8 月是全年日照时数最多的月份，日照时数达 215.3 h。试验区年蒸发量 1 472.5 mm，年平均降雨天数 117 d，年降雨量 1 106.5 mm，年平均温度 15.7 ℃，最大平均湿度 81%，最大风速 19.8 m·s^{-1}，

ChinaXiv合作期刊
chinaXiv:201711.00953v1

无霜期 237 d。

蒸渗仪由水泥、砖块砌成，每个蒸渗仪面积均为 4 m×2 m，蒸渗仪中的土壤是原地按自然层次(测容重)回填的黄棕壤，质地黏重，有机质含量 14.209 $g\cdot kg^{-1}$，全氮 1.303 $g\cdot kg^{-1}$，碱解氮 129.9 $mg\cdot kg^{-1}$，全磷 0.363 $g\cdot kg^{-1}$，速效磷 27.2 $mg\cdot kg^{-1}$，pH 5.87，0~60 cm 土壤容重 1.35 $g\cdot cm^{-3}$，0~60 cm 土壤田间持水量 28.0%(重量含水量)，地下水埋深 10 m。蒸渗仪上面安装防雨棚，以隔绝自然降水。

1.2 试验设计

试验选择烤烟'K326'作为主要材料，每个蒸渗仪栽烟 12 株，行距 1.2 m，株距 0.5 m。试验设 8 个处理：T1 和 T2 处理主要保水材料为风干后的水稻秸秆段，秸秆段长 3~5 cm，施用量 4 500 $kg\cdot hm^{-2}$，覆盖完全后，分别将 EM 复壮液(T1)或 EM 活性钙液(制作方法参考文献[10]，T2)均匀喷施在烟苗根部周围秸秆段表面；T3 和 T4 主要保水材料为 EM 复壮液与 MP3005KM 保水剂，将 MP3005KM 保水剂充分浸泡 24 h 后加入 EM 复壮液，搅拌均匀，穴施于烤烟幼苗根部的侧下方；T5 和 T6 处理主要保水材料为 EM 活性钙液与 MP3005KM 保水剂，施用方法同 T3 和 T4 处理；对照处理 CK1 仅施入 6 $g\cdot 株^{-1}$ MP3005KM 保水剂，将保水剂充分浸泡 24 h 后，穴施于烤烟幼苗根部的侧下方；对照处理 CK2 不采用任何保水措施。具体试验设计和材料用量如表 1 所示。

表 1 试验各处理的材料用量和水肥管理

Table 1 Material dosage and water-nitrogen management under different treatments

处理 Treatment	EM 复壮液 EM rejuvenation ($g\cdot plant^{-1}$)	EM 活性钙 EM activated calcium ($g\cdot plant^{-1}$)	保水剂 Water retention agent ($g\cdot plant^{-1}$)	秸秆 Straw ($g\cdot plant^{-1}$)	施氮 Nitrogen application ($g\cdot plant^{-1}$)	灌水 Irrigation amount (mm)
T1	40	0	0	300	6	400
T2	0	40	0	300	6	400
T3	20	0	6	0	6	400
T4	40	0	6	0	6	400
T5	0	20	6	0	6	400
T6	0	40	6	0	6	400
CK1	0	0	6	0	6	400
CK2	0	0	0	0	6	400

试验模拟烤烟受轻度干旱胁迫，总灌溉量为 400 mm，根据前期研究经验[11]，伸根期、旺长期、成熟期灌溉量分别按总灌溉量的 30%、40%、30%分配，即移栽后在蒸渗仪中每隔 7 d 灌水 1 次，把各生育期的需灌水量平均灌至蒸渗仪土壤中。施肥按基肥∶追肥=7∶3 施用烤烟专用无机肥料(贵州省烟草科学研究院提供，N∶P_2O_5∶K_2O=1∶2∶3)，基肥在烤烟移栽前一次性穴施，追肥时间为移栽后 30 d。

1.3 测定项目与方法

1)烤烟单株叶面积和叶面积指数(LAI)

烤烟移栽 14 d 开始测定烤烟单株叶面积，每隔 7 d 测定烟株的株高、茎围、最大叶长与叶宽，每个处理选取 3 株测定。烤烟单株叶面积的计算方法如下[12]:

$$A_s = \sum_{i=1}^{n}(L_i \times W_i \times 0.634\,5) \tag{1}$$

式中：A_s 为烤烟单株叶面积(cm^2)，n 为烤烟叶面数，L_i 为第 i 片烤烟叶片最大叶长(cm)，W_i 为第 i 片叶片最大叶宽(cm)。

烤烟 LAI 按照如下公式计算:

$$\text{LAI}=As/S \tag{2}$$

式中：As 为单株烤烟的总叶面积(cm^2)，S 为单株烤烟的占地面积(cm^2)。

采用日本学者 Qin 等[13]提出的作物生长模型对 LAI 的动态变化进行模拟:

$$\text{LAI} = \text{LAI}_\text{M} \times [1+(1-\beta)e^{-\alpha(t-\tau)}]^{-1} + \text{LAI}_0(1-\beta) \tag{3}$$

式中：LAI 为叶面积指数，LAI_M 为 LAI 的理论上限，LAI_0 为 LAI 的理论下限，α、β 为生长常数，t 为烤烟移栽后天数，τ 为烤烟 LAI 达到 1/2 LAI_M 值所需要的天数。根据模型原理，模拟烤烟移栽后 14~84 d LAI 的动态变化。

2)烤烟光合特性

于烤烟旺长期(7 月 5 日)和成熟期(8 月 10 日)测定光合指标 2 次，测定时间为 10:30。每个处理定株测定烤烟 3 株，测定叶位为烟株的自上向下第 5 片叶。测定工具为美国 LI-COR 公司生产的 LI-6400 便携式光合测定仪，光强控制在 800 $mol\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$。测定指标包括烤烟叶片的净光合速率($P_n$)、气孔导度

ChinaXiv合作期刊
chinaXiv:201711.00953v1

(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)以及蒸腾速率(T_r)。

3)烤烟产量

烤烟进入成熟期后(约为移栽后 84 d), 开始自下而上采摘烟叶。烤烟产量为烘烤后烟叶质量, $kg\cdot hm^{-2}$。

4)烤烟品质

每个处理选烤烟 3 株, 取每株充分成熟的中部叶进行烘烤, 烘干后碾磨并混合均匀, 待测。测定烟碱、总氮、还原糖和钾等烟叶化学成分, 采用连续流动分析仪, 利用连续流动法测定[14]。

5)灌溉水利用效率(IWUE, $kg\cdot m^{-3}$)[15]

$$IWUE=Y/I \quad (4)$$

式中: Y 为烤烟干产量($kg\cdot hm^{-2}$), I 为总灌溉量($m^3\cdot hm^{-2}$)。

6)氮肥偏生产力

氮肥偏生产力($kg\cdot kg^{-1}$)为施氮区产量与氮素施用量的比值[16]。

7)烤烟品质综合主成分

烤烟品质包含指标数众多且不同指标之间有所关联, 出于 EM 保水制度优选的需要, 本文主要评价烤烟的“综合品质”。采用主成分分析法对烤烟主要品质指标进行主成分提取, 提取原则为“特征值>1, 累积贡献率>80%”[17]。

1.4　熵权系数评价模型

熵权系数评价模型是高维数据处理的有效手段, 其优势在于能够将主观权重与客观权重有机结合, 既考虑了决策者的主观经验, 又充分融合了原始数据信息, 使得结果更为客观、科学。基于对“高产”、“优质”、“节水”和“节肥”的要求, 本文选取烤烟产量、品质、灌溉水利用效率和氮肥偏生产力为主要评价指标, 优选综合效益最优的 EM 保水剂施用制度。建模方法参考文献[18]。

1.5　数据处理

显著性分析(Duncan's multiple range test)与主成分分析均采用 SPSS 17.0 软件。

2　结果与分析

2.1　EM 保水剂对烤烟单株叶面积的影响

由图 1 可知, 移栽后 28~42 d 和 42~63 d 两个阶段烤烟叶面积增幅较大, 63~77 d 增幅相对较小。移栽后 28 d, T6 和 T5 烤烟单株叶面积处于较高水平, 分别达到 2 426.33 cm^2 和 2 380.57 cm^2, 表明以保水剂为主要材料的处理对早期烤烟叶片的生长有较好的促进作用, 以秸秆段为主要材料的处理效果相对较差。移栽后 42~63 d 处于烤烟旺长期, 该阶段烤烟根系迅速下扎, 叶片不断扩张, 至移栽后 63 d, T6 处理烤烟的单株叶面积仍最大, 达 22 057.93 cm^2, CK2 最低, 仅为 16 377.90 cm^2, 显著低于其他处理。值得注意的是, 移栽后 63~77 d, T2 处理烤烟叶面积出现较大幅度增长, 至移栽后 77 d 达到了最高水平, 为 25 925.93 cm^2, 此时 T6 处理烤烟单株叶面积为 25 150.57 cm^2, 略低于 T2, CK2 烤烟单株叶面积最小, 仅为 20 309.47 cm^2。

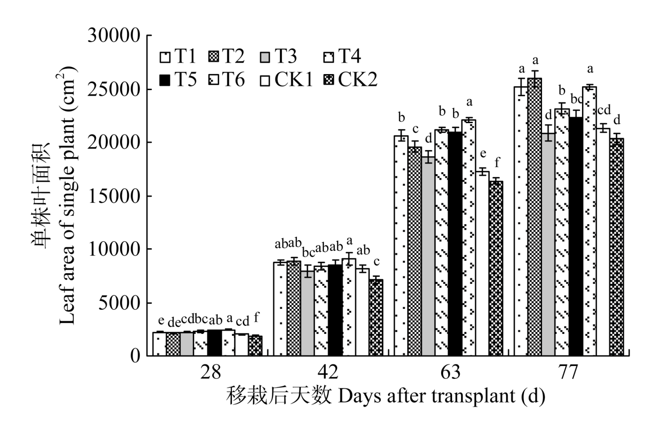


图 1　EM 保水剂施用下烤烟单株叶面积随移栽时间的变化

Fig. 1　Changes of flue-cured tobacco leaf area of single plant with the days after transplant under different EM water-retaining agent application

相同移栽天数不同字母表示在 0.05 水平上不同 EM 保水剂处理间差异显著。Different letters indicate significant difference among different EM water-retaining agent treatments on the same days after transplant at 0.05 level.

2.2　EM 保水剂对烤烟 LAI 的影响

由图 2 可知, 烤烟 LAI 的变化有 3 个主要阶段: 14~28 d 为缓慢增长阶段, 28~84 d 为快速增长阶段, 84~104 d 为衰退阶段。LAI 的衰退主要由于烤烟叶片的成熟及采摘的开始。移栽后 84 d 烤烟 LAI 的峰值是较为关键的指标, 对烤烟长势和产量的评估都

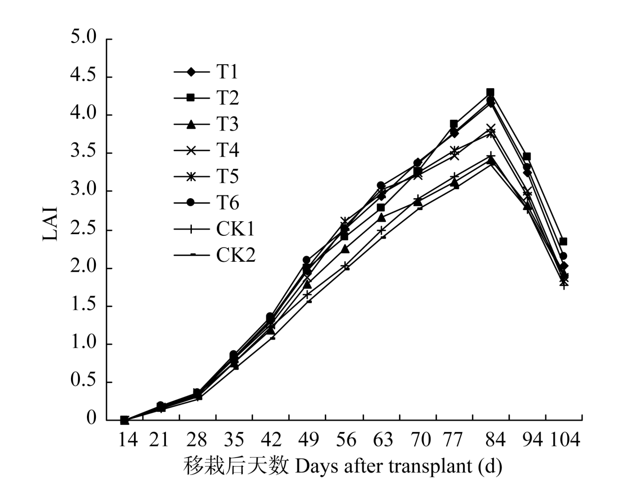


图 2　不同 EM 保水剂处理对烤烟 LAI 动态变化的影响

Fig. 2　Changes of LAI of flue-cured tobacco with the days after transplant as affected by different treatments of EM water-retaining agents

ChinaXiv合作期刊

具有重要的指导意义。从移栽后 84 d 的测定结果来看, T2 处理 LAI 值最高, 达 4.29; T6 处理次之, 为 4.20, 与 T2 处理差别不大; CK2 最低, LAI 值仅为 3.35。单从烤烟 LAI 值来看, T2 和 T6 处理总体表现较优。

用作物生长模型模拟所得的主要参数如表 2 所示。模型中的 LAI_M 值, 预测了不同处理烤烟 LAI 的理论上限。从 LAI_M 值来看, 仍以 T2 最高, 达 4.400; T6 次之, 为 4.351; CK2 最低, 仅为 3.417, 说明 T2 处理下烤烟 LAI 有较大的增长空间, 而 CK2 处理 LAI 增长空间较小。

表 2 不同 EM 保水剂处理用于表征 LAI 变化的作物生长模型的主要参数

Table 2 Main parameters of the crop growth model that reflects the dynamic change of LAI under different EM water-retaining agents application

处理 Treatment	LAI_0	LAI_M	α	β	τ	R
T1	−0.072 5	4.280	0.084 8	−0.442 0	46.39	0.994 8
T2	−0.232 6	4.400	0.080 5	0.382 4	57.29	0.986 1
T3	−0.125 8	3.639	0.083 9	−0.813 4	39.68	0.996 8
T4	−0.097 5	3.937	0.091 4	−0.016 2	48.75	0.996 7
T5	−0.151 6	3.988	0.089 9	−0.585 4	41.19	0.997 2
T6	−0.111 5	4.351	0.083 1	−0.469 9	44.80	0.993 5
CK1	−0.093 5	3.613	0.082 2	0.149 3	52.45	0.994 2
CK2	−0.145 8	3.417	0.085 6	−0.143 6	46.82	0.992 0

2.3 EM 保水剂对旺长期和成熟期烤烟光合特性的影响

表 3 所示为不同处理对烤烟旺长期和成熟期叶片光合特性的影响。旺长期烤烟 P_n 以 T2 最高, 达 18.16 μmol·m^{-2}·s^{-1}; T6 次之; CK2 最低, 仅为 14.57 μmol·m^{-2}·s^{-1}。除对照处理 CK1 和 CK2 外, 各 EM 保水剂处理之间烤烟 P_n 没有明显差异(P>0.05)。相比旺长期, 烤烟成熟期 P_n 有所下降, 仍以 T2 最高, 达 16.10 μmol·m^{-2}·s^{-1}; CK2 最低, 仅为 11.76 μmol·m^{-2}·s^{-1}。说明EM 保水剂处理能有效增加烤烟旺长期和成熟期 P_n 值, 秸秆和 MP3005KM 为主要原料的 EM 保水剂处理分别以 T2 和 T6 对烤烟 P_n 的促进效果最为明显。

表 3 不同 EM 保水剂处理对烤烟旺长期和成熟期主要光合指标的影响

Table 3 Effects of different treatments of EM water-retaining agents on main photosynthesis indicators of flue-cured tobacco at vigorous growth and maturity stages

生育阶段 Growth stage	处理 Treatment	P_n (μmol·m^{-2}·s^{-1})	G_s (mol·m^{-2}·s^{-1})	C_i (μmol·mol^{-1})	T_r (mmol·m^{-2}·s^{-1})
旺长期 Vigorous growth stage	T1	17.82±0.41a	0.47±0.03c	299.37±12.12a	2.86±0.12cd
	T2	18.16±0.82a	0.39±0.02d	307.30±5.88a	2.97±0.08bc
	T3	16.99±0.55a	0.53±0.03abc	280.57±11.19abc	3.20±0.12b
	T4	17.43±0.36a	0.52±0.04bc	287.53±16.57abc	3.14±0.08b
	T5	17.33±0.27a	0.56±0.02ab	295.17±8.13ab	3.19±0.07b
	T6	17.89±0.16a	0.42±0.02d	301.53±13.85a	2.66±0.11d
	CK1	15.29±0.62b	0.58±0.02a	270.50±8.34bc	3.18±0.04b
	CK2	14.57±0.50b	0.54±0.04ab	265.20±16.41c	3.47±0.16a
成熟期 Maturity stage	T1	15.02±0.82ab	0.29±0.03abcd	180.80±6.14b	2.02±0.08bcd
	T2	16.10±0.46a	0.27±0.02cd	194.43±8.00ab	1.84±0.08de
	T3	14.24±0.56b	0.29±0.02abcd	200.17±5.25a	1.96±0.11cde
	T4	15.07±0.85ab	0.32±0.01ab	189.20±7.39ab	2.14±0.11bc
	T5	15.05±0.15ab	0.28±0.02bcd	193.54±4.93ab	2.10±0.08bc
	T6	15.96±0.37a	0.26±0.02d	200.62±8.25a	1.78±0.13e
	CK1	12.51±0.41b	0.30±0.01abc	203.27±12.24a	2.21±0.13ab
	CK2	11.76±0.40b	0.33±0.01a	201.68±3.93a	2.39±0.07a

表中同列同一生育阶段不同字母表示在 0.05 水平不同 EM 保水剂处理间差异显著。Different letters in the same column and at the same growth stage indicate significant difference among different EM water-retaining agent treatments at 0.05 level.

chinaXiv:201711.00953v1

ChinaXiv合作期刊
chinaXiv:201711.00953v1

旺长期 CK1 处理烤烟 G_s 最高，达 0.58 mol·m^{-2}·s^{-1}；T5 处理次之，为 0.56 mol·m^{-2}·s^{-1}；T2 最低，仅为 0.39 mol·m^{-2}·s^{-1}。成熟期烤烟 G_s 有所下降，以 CK2 处理烤烟 G_s 处于较高水平，达 0.33 mol·m^{-2}·s^{-1}；T4 处理次之，为 0.32 mol·m^{-2}·s^{-1}；T6 最低，仅为 0.26 mol·m^{-2}·s^{-1}。从 CK1 和 CK2 处理烤烟 G_s 值来看，单施用保水剂对烤烟 G_s 有一定影响，但影响并不显著。秸秆和 MP3005KM 为主要材料的 EM 保水剂处理分别以 T2 和 T6 烤烟 G_s 较低。

旺长期烤烟 C_i 以 T2 最高，达 307.30 μmol·mol^{-1}；T6 次之，为 301.53 μmol·mol^{-1}，T1、T2 和 T6 处理间烤烟 C_i 没有显著差异(P>0.05)；CK2 旺长期烤烟 C_i 处于较低水平，仅为 265.20 μmol·mol^{-1}。从 T3~T6 处理旺长期烤烟 C_i 来看，高 EM 复壮液与 EM 活性钙用量在一定程度上增加了烤烟 C_i 值，但增加并不明显。不同处理成熟期烤烟 C_i 以 CK1 较高，达 203.27 μmol·mol^{-1}；CK2 次之，为 201.68 μmol·mol^{-1}；T1 最低，仅为 180.80 μmol·mol^{-1}。除 T1 处理较低外，其他处理成熟期烤烟 C_i 没有显著差异(P>0.05)。

旺长期，对照处理 CK2 烤烟 T_r 最高，达 3.47 mmol·m^{-2}·s^{-1}，并显著高于其他处理(P<0.05)；T3 次之，为 3.20 mmol·m^{-2}·s^{-1}；T6 最低，为 2.66 mmol·m^{-2}·s^{-1}。T3~T6 处理烤烟 T_r 测定结果表明，增加 EM 活性钙用量对降低烟叶 T_r 效果十分显著，而增加 EM 复壮液对降低烟叶 T_r 效果并不明显。成熟期烤烟 T_r 较旺长期下降，仍以对照处理 CK2 最高，达 2.39 mmol·m^{-2}·s^{-1}，并显著高于其他处理(P<0.05)；T2 和 T6 处理处于较低水平，分别为 1.84 mmol·m^{-2}·s^{-1} 和 1.78 mmol·m^{-2}·s^{-1}。

2.4　EM 保水剂对烤烟产量、品质、IWUE 和氮肥偏生产力的影响

由表 4 可知，T2 处理烤烟产量最高，达 2 433.5 kg·hm^{-2}；T6 次之，为 2 364.6 kg·hm^{-2}；CK2 最低，仅为 1 898.1 kg·hm^{-2}，显著低于其他处理(P<0.05)。相比对照，不同 EM 保水处理均显著提高了烤烟产量(P<0.05)，其中 T3 处理增产效果相对较差。

各处理烤烟烟碱含量基本处于适宜范围(CK2 除外)。T3、T5、CK1、CK2 总氮含量偏高，其余处理均处于适宜范围。各还原糖含量都处于适宜范围。除 T2、T4 和 T6 外，各处理烤烟钾含量也都处于适宜范围。不同 EM 保水处理降低了烤烟烟碱和总氮含量，提高了烤烟还原糖含量。然而，值得注意的是，不同保水处理同时也降低了烤烟钾含量，这对烟叶的燃烧性可能产生一定影响。EM 复壮液和 EM 活性钙对烤烟主要品质指标影响的差异并不大，但增加其用量降低了烟叶中烟碱、总氮和钾的含量。烤烟 IWUE 和氮肥生产力均以 T2 最高，分别达 0.608 kg·m^{-3} 和 27.04 kg·kg^{-1}，而对照处理 CK1 和 CK2 烤烟 IWUE 和氮肥生产力处于较低水平。

采用主成分分析法对表 4 中烤烟主要品质指标进行主成分提取，所得累积贡献率为 90.25%，保留了大量的原始信息。图 3 列出了不同处理烤烟品质综合主成分值，品质综合主成分值越大，说明烤烟“综合品质”越优，化学成分更为协调。T1 处理烤烟“综合品质”最优，T2 处理次之，CK2 最差。总体来看，以秸秆段为主要材料的 EM 保水处理，其烤烟“综合品质”要优于以 MP3005KM 保水剂为主要材料的处理。

表 4　不同 EM 保水剂处理对烤烟产量、品质(中部叶)、灌溉水利用效率(IWUE)及氮肥偏生产力的影响

Table 4　Effects of different treatments of EM water-retaining agents on yield, quality (middle leaf), irrigation water use efficiency (IWUE) and nitrogen partial productivity of flue-cured tobacco

处理 Treatment	烟碱 Nicotine (mg·g^{-1})	总氮 Total nitrogen (mg·g^{-1})	还原糖 Reducing sugar (mg·g^{-1})	钾 Potassium (mg·g^{-1})	产量 Yield (kg·hm^{-2})	IWUE (kg·m^{-3})	氮肥偏生产力 Nitrogen partial productivity (kg· kg^{-1})
T1	24.89±1.16b	23.32±0.98d	200.52±7.01abc	26.34±0.69ab	2 240.0±54.2b	0.560±0.014b	24.89±0.60b
T2	26.40±0.84b	23.78±1.00d	209.16±12.26ab	24.62±0.37bc	2 433.5±79.1a	0.608±0.020a	27.04±0.88a
T3	26.52±0.38b	26.70±1.04bc	200.29±6.61abc	26.38±1.58ab	2 131.8±41.0c	0.533±0.010c	23.69±0.46c
T4	21.68±1.14c	24.21±1.72cd	213.23±15.13a	24.51±1.02bc	2 184.9±51.1bc	0.546±0.013bc	24.28±0.57bc
T5	26.46±1.15b	27.15±0.87b	210.30±9.88ab	25.15±0.77abc	2 256.5±62.3b	0.564±0.016b	25.07±0.69b
T6	22.35±0.97c	22.97±1.28d	220.51±7.98a	23.27±1.74c	2 364.6±78.2ab	0.591±0.020ab	26.27±0.87ab
CK1	25.34±0.47b	27.41±0.93b	189.36±8.34bc	27.40±1.02a	2 068.1±18.7d	0.517±0.005d	22.98±0.21d
CK2	28.66±1.15a	30.48±1.38a	182.95±10.13c	26.58±0.55ab	1 898.1±67.0e	0.475±0.017e	21.09±0.74e
适宜范围 Reasonable range	22~28	20~25	180~220	≥25			

表中同列不同字母表示在 0.05 水平上差异显著。Different letters in the same column indicate significant differences at 0.05 level.

ChinaXiv合作期刊

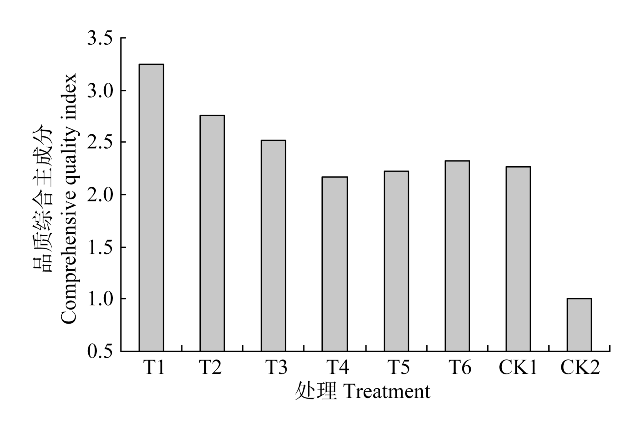


图 3 不同 **EM** 保水剂处理对烤烟品质综合主成分的影响
Fig. 3 Effects of different treatments of EM water-retaining agents on comprehensive quality index of flue-cured tobacco

2.5 EM 保水剂施用制度的优选

在 EM 保水剂施用制度的优选过程中，本文选取的评价指标分别为烤烟产量、烤烟品质综合主成分、烤烟 IWUE 和烤烟氮肥偏生产力。不难看出，本文所选取的 4 个指标均为收益性指标。在熵权系数评价模型计算过程中，分别赋予烤烟产量、烤烟品质综合主成分、烤烟 IWUE 和烤烟氮肥偏生产力主观权重 0.3、0.3、0.3 和 0.1，根据原始数据信息计算所得的客观权重分别为 0.240 6、0.240 5、0.278 2 和 0.240 6，最终的综合权重分别为 0.286 6、0.286 6、0.331 3 和 0.095 5。计算所得 T1~CK2 的熵权系数评价值分别为 0.947 0、0.949 7、0.842 1、0.821 4、0.847 1、0.886 6、0.798 6 和 0.623 7，表明 T2 为最优 EM 保水剂施用制度。

3 讨论与结论

除 T3 外，不同 EM 保水剂处理均对烤烟单株叶面积的增长有显著促进作用，证明合理的 EM 保水剂配方可有效提高烤烟鲜产。与此同时, EM 保水剂处理也提高了烤烟产量，这与陆耀凡等[19]和王玉萍等[20]以秸秆和高分子树脂为保水剂的主要材料的研究结果一致。不难发现，烤烟生长中后期，秸秆为主要原料的 EM 保水处理烤烟单株叶面积增幅最大，这可能由于随着灌水次数的增多及有效微生物的作用，秸秆中的养分逐渐释放，在一定程度上增加了烤烟的养分供应。王美新等[8]的研究表明，EM 的施用能提高土壤速效养分含量。

过去的研究中，我们报道了烤烟 LAI 的模拟模型：余弦模型、普适模型、线性模型和指数模型[11]。这些模型主要依据烤烟 LAI 变化的曲线形式进行模拟，所得参数意义有限。而本文引入的作物生长模型中，所得参数对烤烟长势和产量预测具备很好的指导作用，具有较好的应用价值。

从 EM 保水剂对烤烟品质的影响来看，秸秆的“提质”效果优于 MP3005KM 保水剂。左广玲等[21]的研究表明，施入秸秆基保水剂后，土壤的平均含水率较对照提高 3.1%，烟叶增产 18.4%，上等烟比例提高 6.8%。本试验中，秸秆和 MP3005KM 保水剂为主要材料的保水处理对烤烟品质影响的差异可能主要源于其保水机理的不同：MP3005KM 保水剂在烤烟根系周围形成一个局部的“小水库”[22]，向烤烟根系提供水分；而秸秆段均匀地覆盖在土壤表面，物理上隔绝了土壤和外界环境，降低了土面蒸发。从表象上看，秸秆覆盖下的土壤能较长时间保持湿润，而 MP3005KM 保水剂仅能保证土壤的局部湿润，且一旦 MP3005KM 保水剂暴露出土面，其已吸纳的水分会迅速蒸发。总体上，秸秆的保水效果更好，最终在烤烟品质上有所体现。

光合方面，EM 保水剂对烤烟 P_n 的促进作用可能由于其增加了烟株的水分供应，也可能由于 EM 保水剂的施用提高了肥料营养中氮素营养的有效性[23]。赵铭钦等[24]认为，保水剂主要通过调节烟叶的 G_s 来影响其 P_n。总体来看，EM 活性钙降低烟叶 G_s 的效果优于 EM 复壮液，这可能由于 Ca^{2+} 的作用，有研究表明，Ca^{2+} 在控制细胞和组织的发育中具有重要的作用，能促进烟株生长，提高烤烟抗旱能力[25]。各 EM 保水剂处理旺长期烤烟 C_i 明显高于对照处理，这可能由于 EM 保水剂处理降低了烤烟 G_s，在进入细胞间隙 CO_2 浓度不变及合成能力有限的情况下，烤烟细胞间 CO_2 略有盈余。此外，无论是单施用保水剂处理还是 EM 保水剂处理，均能降低烤烟 T_r，这也印证和补充了许志强等[26]的研究结果。

熵权系数评价模型计算结果显示，T2 处理为最优 EM 保水剂施用制度，这表明 T2 处理在“高产”、“优质”、“节水”和“节肥”等方面的综合效益最优。尽管 T6 处理在“高产”、“节水”和“节肥”方面有较好表现，但由于其烟叶综合品质相对较差，拉低了熵权系数评价值。与投影寻踪分类模型等其他优选模型相比，熵权系数评价模型结合了主观权重和客观权重，遵循了原始数据信息又考虑了决策者主观经验，使得优选结果更为可靠、科学。特别地，本文将 4 个烤烟品质指标转化为“品质综合主成分”，来参与熵权系数评价模型的计算，有效避免了品质指标包含子项过多造成的权重分配不合理的现象。本研究选取了产量、品质等指标来考察 EM 保水剂的效应，但未涉及土壤和根系指标，如土壤含水率、烤烟根

chinaXiv:201711.00953v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:201711.00953v1

系活力等，相关内容有待进一步研究。

由于我国植烟区域分布广泛，土壤类型多样，不同土壤干旱条件下适宜的保水剂用量、制备方法等必有所差异。因此，在确定保水剂用量之前，可有针对性地开展“裸土蒸发”试验，即在没有种植烤烟的条件下，测定不同保水剂处理的逐日蒸发量，作为设计保水剂用量的依据。本研究在南京开展，与主要干旱烟区的气候条件存在一定的差异，故本试验结果在应用时，可根据实际情况适当修正相关的参数。目前，秸秆和保水剂在烤烟栽培中的应用方法已不乏报道，而 EM 的使用技术和方法的研究有待加强。EM 保水剂的研发应以“高产、优质、节水”及“环境友好型”为主要方向。另外，由于 EM 成本较高，在施用前往往需进行扩大培养，在培养过程中，如何解决好微生物菌群在扩大培养过程中的协调性和共生性问题也是研究的关键。本研究中，以秸秆为主要材料的 EM 保水剂成本约为 0.14~0.18 元·株$^{-1}$，以 MP3005KM 为主要材料的 EM 保水剂成本约为 0.42~0.50 元·株$^{-1}$。

总之，EM 保水剂处理有益于烤烟的生长发育和产量、品质的提高。40 g·株$^{-1}$ EM 活性钙结合 4 500 kg·hm^{-2} 秸秆段具备最优的综合效益，提高了烤烟单株叶面积、LAI 和 LAI_M 值，增加了烤烟旺长期和成熟期 P_n 并降低了其 T_r，改善了烟叶的“综合品质”。本研究推荐 40 g·株$^{-1}$ EM 活性钙结合 4 500 kg·hm^{-2} 秸秆段作为 EM 保水剂的施用制度。

参考文献 References

[1] 闫玉民，王玉书，侯毛毛. 烤烟节水灌溉技术研究进展[J]. 贵州农业科学, 2012, 40(12): 73–75
Yan Y M, Wang Y S, Hou M M. Advances in water-saving irrigation technology of flue-cured tobacco[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2012, 40(12): 73–75

[2] 车安斌，尚军，冉清，等. 土壤水分对烤烟生长发育和产质量的影响[J]. 贵州农业科学, 2012, 40(8): 75–77
Che A B, Shang J, Ran Q, et al. Effects of soil moisture on growth, yield and quality of flue-cured tobacco[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2012, 40(8): 75–77

[3] 朱云峰. 保水剂对松苗抗旱及与抗松树枯梢病关系的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2004
Zhu Y F. Studies on anti-drought and resistence to *Sphaeropsis sapinea* of pine seedlings treated with water-retaining-agents[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2004

[4] 丁林，张新民. 保水剂对春玉米注水播种条件下土壤水分及生长发育的影响[J]. 中国农村水利水电, 2010(11): 56–60
Ding L, Zhang X M. The effect of soil moisture and growing dynamic of maize after sowing with water use water holding agent[J]. China Rural Water and Hydropower, 2010(11): 56–60

[5] 苟春林，王新爱，李永胜，等. 保水剂与氮肥的相互影响及节水保肥效果[J]. 中国农业科学, 2011, 44(19): 4015–4021
Gou C L, Wang X A, Li Y S, et al. Interaction between water retaining agent and nitrogen fertilizers and the effect of water and fertilizer conservation[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(19): 4015–4021

[6] Hu C, Qi Y C. Effective microorganisms and compost favor nematodes in wheat crops[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2013, 33(3): 573–579

[7] Hu C, Qi Y C. Long-term effective microorganisms application promote growth and increase yields and nutrition of wheat in China[J]. European Journal of Agronomy, 2013, 46: 63–67

[8] 王美新，邵孝侯，于静，等. EM 生物有机肥对植烟土壤理化性质的影响[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(6): 323–325
Wang M X, Shao X H, Yu J, et al. Effects of EM bio-organic fertilizer on physical and chemical properties of tobacco-planting soil[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2012, 40(6): 323–325

[9] Zhou Y X, Zhen S C, Zhai Y M. The application of EM-treated dairy effluent on the flue-cured tobacco irrigation[J]. Food, Agriculture and Environment, 2013, 11(1): 960–964

[10] Shao X H, Hou M M, Chen J N. Effects of EM-calcium spray on Ca uptake, blossom-end rot incidence and yield of greenhouse tomatoes (*Lycopersicon esculentum*)[J]. Research on Crops, 2013, 14: 1159–1166

[11] 侯毛毛，邵孝侯，袁有波，等. 水氮耦合条件下烤烟叶面积指数变化的模型研究[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(1): 106–108
Hou M M, Shao X H, Yuan Y B, et al. Simulation model of the leaf area index of tobacco under water and nitrogen coupling condition[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(1): 106–108

[12] Hou M M, Shao X H, Chen J N, et al. A simple method to estimate tobacco LAI and soil evaporation[J]. Food, Agriculture and Environment, 2013, 11(2): 1216–1220

[13] Qin F F, Xu H L, Ma G. Garlic sprouts grown indoors at kitchen sites[J]. Mediinal and Aromatic Plant Science and Biotechnology, 2008, 2(2): 117–122

[14] 闫建文. 基于 ^{15}N 示踪技术的烤烟水氮耦合方案熵权系数评价[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2014, 42(11): 25–31
Yan J W. ^{15}N tracing technique based evaluation of entropy weight coefficients of water and nitrogen coupling schemes for flue-cured tobacco[J]. Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition, 2014, 42(11): 25–31

[15] Rathore S S, Shekhawat K, Premi O P, et al. Water use efficiency, productivity, photosynthesis and sustainability of pressurized irrigation systems for Indian mustard [*Brassica juncea* (L.) Czern and Coss.] under semi-arid conditions of Rajasthan[J]. Research on Crops, 2013, 14(1): 140

[16] 陈丹艳. 烤烟水肥耦合效应研究及其决策系统研究[D]. 南京: 河海大学, 2014

ChinaXiv合作期刊

Chen D Y. Water and nitrogen coupling effects of flue-cured tobacco and the expert decision system[D]. Nanjing: Hohai University, 2014

[17] Zhai Y M, Jin Y J, Chen L H. Optimization study on the space and depth of subsurface drainage tubes for greenhouse salty soils: A 3-year field experiment in South of China[J]. Advance Journal of Food Science and Technology, 2015, 7(11): 899–904

[18] 邵光成, 郭瑞琪, 蓝晶晶, 等. 避雨栽培条件下番茄灌排方案熵权系数评价[J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(6): 733–737

Shao G C, Guo R Q, Lan J J, et al. Entropy weight coefficient evaluation of irrigation and drainage scheme based on analysis of quality and rain ingredients of tomato[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(6): 733–737

[19] 陆耀凡, 黄尚丰, 农远藩, 等. 化学抗旱剂在烤烟生产上的应用试验[J]. 广西气象, 2000, 21(1): 47–50

Lu Y F, Huang S F, Nong Y F, et al. Application experiment of chemical drought resistance agent to the production of tobacco[J]. Journal of Guangxi Meteorology, 2000, 21(1): 47–50

[20] 王玉萍, 房军. 烤烟栽培保水抗旱技术研究[J]. 西南农业学报, 2009, 22(6): 1542–1545

Wang Y P, Fang J. Application of water conservation technique in cultivation of flue-cured tobacco[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2009, 22(6): 1542–1545

[21] 左广玲, 叶红勇, 杜朝军, 等. 大豆秸秆基保水剂对烟田土壤水分及烟草生长的影响[J]. 河南农业科学, 2011, 40(1): 79–81

Zuo G L, Ye H Y, Du C J, et al. Effects of soybean straw-based water retaining agent on the tobacco field moisture and tobacco growth[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2011, 40(1): 79–81

[22] Hou M M, Shao X H, Zhai Y M. Effects of different regulatory methods on improvement of greenhouse saline soils, tomato quality, and yield[J]. The Scientific World Journal, 2014, 2014: 953675

[23] Mikkelsen R L. Using hydrophilic polymers to control nutrient release[J]. Fertilizer Research, 1994, 38(1): 53–59

[24] 赵铭钦, 赵进恒, 张迪, 等. 保水剂对烤烟光合特性日变化的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(6): 1265–1273

Zhao M Q, Zhao J H, Zhang D, et al. Effects of water retention agent on diurnal changes of photosynthetic characteristics in flue-cured tobacco[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(6): 1265–1273

[25] 张苧元. 烟草叶片脉络性状及影响因素的研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2009

Zhang N Y. Study on characteristics of tobacco leaf veins and its impact factors[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2009

[26] 许志强, 吴院生. 保护地无公害蔬菜生产关键技术[J]. 现代园艺, 2010(7): 26–27

Xu Z Q, Wu Y S. Key production technology of pollution-free vegetable in protected area[J]. Modern Horticulture, 2010(7): 26–27

chinaXiv:201711.00953v1